

This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

**As rescanning documents *will not* correct images,
please do not report the images to the
Image Problem Mailbox.**

THIS PAGE BLANK (USPTO)



DEUTSCHES
PATENTAMT

21 Aktenzeichen: 196 39 213.6
22 Anmeldetag: 25. 9. 96
43 Offenlegungstag: 26. 3. 98

DE 196 39 213 A 1

71 Anmelder:

Steinchen, Wolfgang, Prof. Dr.-Ing., 34128 Kassel,
DE

74 Vertreter:

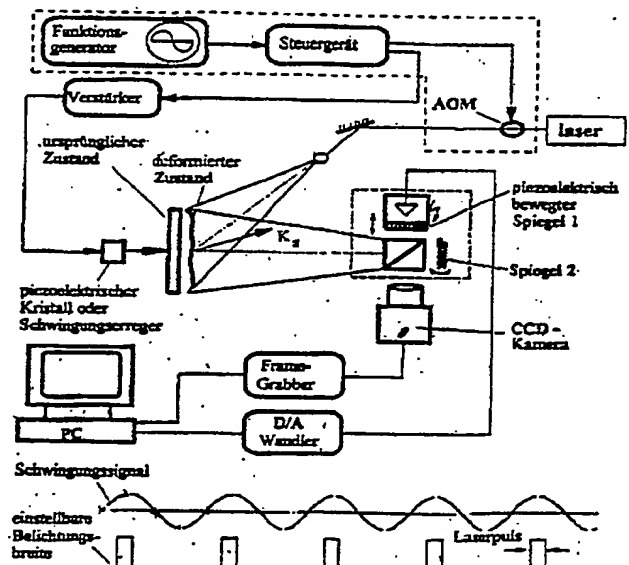
Frhr. von Schorlemer, R., Dipl.-Phys., Pat.-Anw.,
34117 Kassel

72 Erfinder:

Steinchen, Wolfgang, Prof. Dr.-Ing., 34128 Kassel,
DE; Kupfer, Gerhard, Ing.(grad.), 34270
Schauenburg, DE; Yang, Lianxiang, 34117 Kassel, DE

54 Verfahren und Vorrichtung für die Shearing-Speckle-Interferometrie an schwingenden Objekten

57 Die Erfindung geht von einem Verfahren und einer Vorrichtung zur shearografischen Ermittlung von Ableitungen der Verformung einer Oberfläche eines schwingenden Objekts in wenigstens eine ausgewählte Richtung aus, w bei die Objektoberfläche mit kohärentem Licht bestrahlt und das von dieser diffus reflektierte Licht mittels eines ein Shearing-Element aufweisenden optischen Systems in einer Bildebene abgebildet und von der Objektoberfläche wenigstens ein Null-Shearogramm und ein Belastungs-Shearogramm aufgenommen wird. Nach einem Merkmal der Erfindung werden dabei beide Shearogramme voneinander subtrahiert, doch wird anstelle des üblichen Null-Shearogramms ein im jeweils vorhergehenden Videotakt aufgenommenes Referenz-Shearogramm verwendet. Nach einem anderen Merkmal der Erfindung wird das Objekt in Schwingungen versetzt und der Laserstrahl synchron dazu derart gesteuert, daß die Belichtung des Objekts jeweils nur während vorgewählter Schwingungszustände erfolgt. Dabei weist die Vorrichtung zweckmäßige Mittel zur wahlweisen permanenten Einschaltung des Laserstrahls, z. B. in Form eines akusto-optischen Modulators (ADM) auf (Fig. 6).



DE 196 39 213 A 1

Die Erfindung betrifft Verfahren und Vorrichtungen zur Untersuchung schwingender Objekte mittels der Shearing-Speckle-Interferometrie.

Bisher bekannt gewordene Verfahren und Vorrichtungen dieser Art (DE 44 14 287 A1, DE 44 46 887 A1) befassen sich nahezu ausschließlich mit der Untersuchung von stationär angeordneten Objekten. Dazu wird zunächst ein sog. Nullshearogramm bei unbelastetem Objekt erzeugt, mit einem optoelektronischen Bildaufnehmer, insbesondere auf CCD-Basis, aufgenommen und dann in einem Speicher, z. B. einem Frame-Grabber, gespeichert. Anschließend wird das Objekt belastet, und es wird dann ein zweites, sog. Belastungsshearogramm aufgenommen und ebenfalls abgespeichert. Durch Subtraktion oder Addition beider Shearogramme kann das Ergebnis pixelweise auf einem Bildschirm dargestellt werden. Ist zusätzlich eine rechnerische Auswertung erwünscht, werden die Shearogramme zusätzlich bei mehreren, genau definierten Phasenverschiebungen von z. B. 0° , $+120^\circ$ und -120° aufgenommen, wobei die Phasenschiebung z. B. mittels einer Vorrichtung nach Art eines Michelson-Interferometers erfolgt.

Daneben ist es bereits bekannt (DE 44 46 887 A1), zu Schwingungen angeregte Objekte während des Schwingungsvorgangs zu untersuchen, indem z. B. Verschlüsse einer Abbildungsoptik so gesteuert werden, daß ihre halbe, einfache oder doppelte Frequenz mit der Anregungsfrequenz des schwingenden Objekts übereinstimmt, wozu die Verschlüsse z. B. als akusto- oder elektrooptische Modulatoren ausgebildet werden. Dadurch ist es im Prinzip möglich, reine in-plane und out-of-plane Dehnungen in Echtzeit sichtbar zu machen.

Bei der Untersuchung schwingender Objekte ergeben sich allerdings erhebliche Probleme. Diese bestehen einerseits darin, daß die bisher übliche Differenzbildung aus einem früher abgespeicherten, nicht belasteten Zustand des Objekts und einem durch die Schwingung sich zufällig ergebenden, belasteten Zustand des Objekts zu sehr unscharfen Echtzeit-Bildern führt. Dies ist vor allem eine Folge davon, daß jede CCD-Zelle während der üblichen Videotakte von 25 msec Dauer in unterschiedlicher Weise belichtet wird, so daß eine Vielzahl von überlagerten Bildelementen entsteht, die insgesamt zu einem Mischbild mit geringem Kontrast führen. Außerdem ergibt sich der wesentliche Nachteil, daß während der Schwingungen keine definierten Phasenschiebungen möglich und daher die üblicherweise angewendeten Auswertungsverfahren nicht durchführbar sind. Eine rechnerische Ermittlung der Dehnungen ist daher bisher nicht möglich.

Vor diesem Stand der Technik liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, die eingangs erläuterten Verfahren und Vorrichtungen dahingehend zu verbessern, daß einerseits Echtzeit-Betrachtungen mit gutem Kontrast vorgenommen und andererseits die von den schwingenden Objekten erhaltenen Shearogramme rechnerisch ausgewertet werden können.

Zur Lösung dieser Aufgabe dienen die Merkmale der Ansprüche 1, 4 und 6.

Weitere vorteilhafte Merkmale ergeben sich aus den Unteransprüchen.

Die Erfindung wird nachfolgend in Verbindung mit der beiliegenden Zeichnung an Ausführungsbeispielen näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 eine bekannte Vorrichtung zur Durchführung der digitalen Shearografie;

Fig. 2 in einem Schaubild die Änderungen der konventionellen Echtzeit-Streifenfunktion $[1 - J_0(\Omega)]$ gegen Ω , mit $\Omega = \delta \times \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial x}$;

Fig. 3 in einem Schaubild die Änderungen der Echtzeit-Streifenfunktion bei Anwendung der Erfindung mit erneuertem Referenz-Bild $J_0(\Omega)$ gegen Ω mit $\Omega = \delta \times \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial x}$;

Fig. 4 Echtzeit-Darstellungen von digitalen Zeitmittlungs-Shearogrammen für eine umlaufend eingespannte rechteckige Stahlplatte mit vier auf der Rückseite angebrachten Aussparungen bei Anregung mit unterschiedlichen Frequenzen, wobei (a) die Form und die Lage der vier Aussparungen zeigt und (b) bis (f) die digitalen Zeitmittlungs-Shearogramme entsprechend den Schwingungsfrequenzen von 4317 Hz, 4411 Hz, 4486 Hz, 4875 Hz bzw. 4960 Hz zeigen;

Fig. 5 digitale Zeitmittlungs-Shearogramme einer allseitig eingespannten, dünnen, kreisförmigen Aluminiumplatte bei harmonischer Anregung mit den Frequenzen (von links nach rechts) 1270 Hz, 4300 Hz bzw. 4860 Hz;

Fig. 6 schematisch den Aufbau einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur digitalen Shearografie mit stroboskopischer Beleuchtung unter Benutzung eines akusto-optischen Modulators (AOM) für Schwingungsmessungen;

Fig. 7 Phasenverteilungen von Shearogrammen, die die Verformungsgradienten für die dünne kreisförmige Aluminiumplatte nach Fig. 5 bei Anwendung derselben Anregungsmethode und derselben Frequenzen (wiederum von links nach rechts) zeigen;

Fig. 8 die dynamische Untersuchung einer Turbinenschaufel, wobei (a) die untersuchte Turbinenschaufel, (b) die Phasenverteilung des Shearogramms für den Verformungsgradienten $\partial w / \partial x$ und die Frequenz $f = 1572$ Hz, (c) die entfaltete Phasenverteilung und (d) das 3D-Diagramm des Feldes der Verformungsgradienten zeigt;

Fig. 9 jeweils Streifenmuster, wobei (a) Verformungsfeld (w), das durch Integration des entfalteten Phasenbildes aus Fig. 8c erhalten wird, und (b) das 3D-Verformungsfeld, d. h. den Schwingungszustand darstellt;

Fig. 10 in (a) ein Streifenmuster, das das Biegedehnungsfeld ϵ_{xx} , das durch Differentiation des Phasenbildes des in Fig. 8b gezeigten Shearogramms erhalten wurde, und in (b) das 3D-Diagramm des Biegedehnungsfeldes;

Fig. 11 ein Blockschaltbild des Steuergeräts nach Fig. 6; und

Fig. 12 die Frontplatte eines Gehäuses des Steuergeräts nach Fig. 6.

Schwingungen i. a. und Resonanzen im besonderen sind unerwünschte Erscheinungen in Bauteilen und Strukturen, weil erhöhte Spannungen und Energieverluste sie begleiten; sie sollten deshalb vermieden oder weitge-

hend reduziert werden.

Holografie und Speckle Pattern (Muster) Interferometrie (SPI) sind zwei typische experimentelle Analysemethoden zur vollflächigen und berührungslosen Verformungsmessung. Sie wurden in den letzten Jahren zur Schwingungsanalyse von Bauteilen und Strukturen z. B. als qualitative, flächenoptische Modalanalyse angewendet. Die Grenzen dieser Techniken liegen bei der Empfindlichkeit gegen Starrkörperbewegungen und der starken Streifenzunahme aufgrund der Verformung, die die Interpretation der Streifenmuster erschweren. Der weitere Nachteil der Methoden rührt von dem geringen Meßbereich her, so daß nur kleine Deformationen gemessen werden können.

Die Lösung des Problems, die unempfindlich gegen Starrkörperverschiebungen ist und einen größeren Meßbereich zuläßt, stellt die Shearografie (auch Speckle Pattern Shearing Interferometry oder SPSI genannt) dar. Anstelle der Verformungsmessung mittels Hologramminterferometrie und SPI mißt die Shearografie direkt die Ableitung der Ganzfeld-Verformung, bedingt durch das sich "selbstkalibrierende" optische System. Mit der Anwendung der Bildverarbeitung, die das Naßentwickeln und die optische Rekonstruktion der Shearogramme auf Filmen eliminiert, wird die shearografische Messung in der Industrie und im Labor wirtschaftlicher und schneller.

In der konventionellen Echtzeit-Beobachtungs-Technik zur Schwingungsmessung bezieht sich das Referenz-Bild bei der Doppelbelichtungsmethode üblicherweise auf den stationären Grundzustand; die laufenden Bilder werden vom ursprünglichen Referenzbild in Echtzeit subtrahiert und das Ergebnis kann im Videotakt mit geringerem Streifenkontrast beobachtet werden.

Echtzeit-Beobachtung mittels Digital-Shearogramm eines schwingenden Objekts

Digital-Shearografie (DSPSI oder TV-Shearografie) ist eine Weiterentwicklung der fotografischen Shearografie. Zwischen beiden Methoden besteht kein Unterschied in der optischen Theorie, doch ist DSPSI ein rechnerunterstützter Vorgang, der zu einem beschleunigten Prüfablauf führt, weil das Shearogramm in Echtzeit (mit Videotakt) beobachtet werden kann. Fig. 1 zeigt die experimentelle Anordnung der Digital-Shearografie. Das Prüfobjekt wird von einem aufgeweiteten Laserstrahl beleuchtet. Das von der Objektoberfläche reflektierte Licht interferiert in der Bildebene der CCD-Shearing-Kamera, vor deren Objektiv sich ein Michelson-Interferometer befindet, so daß seitlich vershear-te Bilder des Objekts in der Bildebene der CCD-Kamera dadurch erzeugt werden, indem der Spiegel 1 aus der senkrechten Position um einen kleinen Winkel verdreht wird. Die Lichtstrahlen der beiden Bilder interferieren und bilden ein Interferogramm oder Specklemuster.

Zur Schwingungsmessung mit der konventionellen Echtzeit-Subtraktions-Methode zeichnet die CCD-Kamera zuerst die Intensitätsverteilung $I_r(x,y)$ das dem stationären Grundzustand des Objekts entsprechende Specklemuster auf und speichert es im Referenz-Bildspeicher nach Gl (1):

$$I_r(x,y) = 2 I_0 \{1 + \gamma \cos[\Phi(x,y)]\} \quad (1)$$

in der I_0 die mittlere Intensität zweier vershear-ter Lichtwellen, γ die Modulation des Interferenzterms und $\Phi(x,y)$ der beliebige relative Phasenwinkel zwischen zwei vershear-ten Bildern ist. Wird das Objekt angeregt, dann ändert sich die Intensitätsverteilung des Specklemusters geringfügig aufgrund der Differenz in der relativen Phasenwinkel-Verteilung nach Gl (2):

$$I(x,y) = 2 I_0 \{1 + \gamma \cos[\Phi(x,y) + \Delta(x,y,t)]\} \quad (2)$$

in der Δ die relative Phasenänderung infolge der Lichtwegdifferenz durch das schwingende Objekt ist. Die digitale Subtraktion zwischen dem aktuellen und dem Referenz-Bild ergibt ein sichtbares Streifenmuster, ein sog. Digital-Shearogramm. Eine kommerzielle Bildverarbeitungskarte erlaubt, das laufende Bild vom Referenz-Bild in Echtzeit zu subtrahieren und das Digital-Shearogramm auf dem Monitor im Videotakt zu beobachten.

Wenn das Objekt in einem stationären Zustand mit einer Frequenz schwingt, die höher ist als es dem Videotakt entspricht, ändert sich das Specklemuster entsprechend und seine Intensität wird vom CCD-Chip der Kamera während der Zeitspanne T_f für die Bildaufnahme integriert. Während das Objekt schwingt, wird das Bild in dem aktuellen Bildspeicher als Zeitmittlungs-Korrelogramm aufgezeichnet (Fig. 2).

$$I(x,y)_{\text{avg}} = \frac{1}{T_f} \int_0^{T_f} 2 I_0 \{1 + \gamma \cos[\Phi(x,y) + \Delta(x,y,t)]\} dt. \quad (3)$$

Im Fall der Sinusschwingung kann die Amplitude $A(t)$ gegen die Zeit folgendermaßen geschrieben werden:

$$A(t) = A \sin \omega t = (u e_x + v e_y + w e_z) \sin \omega t \quad (4)$$

wobei A bzw. ω der Amplitudenvektor bzw. die Winkelgeschwindigkeit sind; u, v, w stellen die Komponenten des Amplitudenvektors in x, y und z -Richtung und e_x, e_y und e_z die Einheitsvektoren ebenfalls in x, y und z -Richtung dar. Die relative Phasendifferenz $\Delta(x,y,t)$ ist mit dem Gradienten der Verformung infolge des Shearing Prinzips der Shearografie verknüpft. Wenn die Shearrichtung in der x -Richtung liegt, ist $\Delta(x,y,t)$ folgendermaßen gegeben:

$$\Delta(x,y,t) = \delta x [(k_s \partial A / \partial x)] \sin \omega t \\ = \delta x (\partial w / \partial x k_s e_x + \partial v / \partial x k_s e_y + \partial w / \partial x k_s e_z) \sin \omega t \quad (5)$$

Darin sind δx der Shearbetrag in x-Richtung und k_s der Empfindlichkeitsvektor. k_s ist die Winkelhalbierende zwischen der Beleuchtungs- und Beobachtungsrichtung und seine Größe $|k_s|$ entspricht $(4\pi/\lambda) \cos(\Theta/2)$; Θ ist der Beleuchtungswinkel (Fig. 1). Durch Drehen der Beleuchtung in die Richtung senkrecht zur Objektoberfläche fällt sie mit der z-Richtung zusammen, wodurch $k_s e_x = k_s e_y = 0$ und $k_s e_z = |k_s| = (4\pi/\lambda)$ (für $\Theta = 0^\circ$ und $\lambda =$ Wellenlänge des Lasers) werden. Damit ist die relative Phasendifferenz $\Delta(x,y,t)$ nur noch mit der out-of-plane Verformungsneigung verbunden:

$$\Delta(x,y,t) = (\delta x \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial x}) \sin \omega t. \quad (6)$$

Damit kann Gl. (3) folgendermaßen geschrieben werden:

$$I(x,y)_{ave} = 2 I_0 + 2 I_0 \gamma \frac{1}{T_f} \int_0^{T_f} \cos [\phi(x,y) + (\delta x \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial x}) \sin \omega t] dt \\ = 2 I_0 [1 + \gamma \cos \phi(x,y) J_0(\delta x \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial x})] \\ = 2 I_0 [1 + \gamma \cos \phi(x,y) J_0(\Omega)], \quad (7)$$

worin J_0 die Besselfunktion erster Art nullter Ordnung und $\Omega = \delta x (4\pi/\lambda) (\partial w / \partial x)$ sind. Bei der konventionellen Echtzeit-Subtraktions-Methode werden die aktuellen Bilder entsprechend $I(x,y)_{ave}$ wiederholt im Videotakt von den im stationären Objektzustand aufgezeichneten Referenzbildern $I_r(x,y)$ subtrahiert und erscheinen in Echtzeit auf dem Bildschirm als Gl. (8) dargestellt:

$$I_s = I_r(x,y) - I(x,y)_{ave} \\ = 2 I_0 \{1 + \gamma \cos [\Phi(x,y)]\} - 2 I_0 [1 + \gamma \cos \Phi(x,y) J_0(\Omega)] \\ = \gamma \cos \Phi(x,y) [1 - J_0(\Omega)]. \quad (8)$$

Gl. (8) zeigt, daß das Echtzeit-Subtraktions-Streifenmuster eines schwingenden Objekts durch ein Streifensystem mit $[1 - J_0(\Omega)]$ moduliert wird (Fig. 2), wobei sich ein schlechter Streifenkontrast einstellt.

Die Echtzeit-Subtraktions-Technik mit wiederholt erneuertem Referenzbild nach der Erfindung zeigt das Streifenmuster eines schwingenden Objekts, das durch ein Streifensystem mit $J_0^2(\Omega)$ und nicht mit $[1 - J_0(\Omega)]$ wie im vorherigen Fall moduliert wird, wodurch der Streifenkontrast des "Schwingungsshearogramms" sehr viel besser wird. Bei der Messung wird das aktuelle Bild ständig von dem unmittelbar vorhergehenden Bild sofort subtrahiert und nicht von dem Referenzbild des stationären Grundzustands. Die Phasenschiebung wird während der Videosequenz in jedem weiteren Bild vorgenommen, und zwar mittels des elektrisch angetriebenen und vom PC gesteuerten Piezospiegel 2 im Michelson-Interferometer (Fig. 1). Wenn das aktuelle Bild das N-te Bild darstellt, so ist das Referenzbild das (N-1)-te Bild und nicht das erste Bild wie bei der konventionellen Methode. Deshalb wird das Referenz-Bild ständig erneuert.

Wenn das Prüfobjekt in einem stationären Zustand mit einer Frequenz schwingt, die höher ist als der Videotakt, dann ist das aufgezeichnete Bild als (N-1)-tes Bild ein Zeitmittlungs-Shearogramm während der (N-1)-ten Bildperiode T_f (vgl. Gl. (7)) und wie folgt festgelegt:

$$I_{N-1}(x,y)_{ave} = 2 I_0 [1 + \gamma \cos \Phi(x,y) J_0(\Omega)] \quad (9)$$

Nach der Einführung einer 90° Phasenschiebung (wie bei diesem experimentellen Aufbau, aber auch jeder andere Wert ist möglich) wird das N-te Bild aufgezeichnet:

$$I_N(x,y)_{ave} = 2 I_0 \{1 + \gamma \cos [\Phi(x,y) + 90^\circ] J_0(\Omega)\} \\ = 2 I_0 [1 - \gamma \sin \Phi(x,y) J_0(\Omega)] \quad (10)$$

Das aktuelle Bild, z. B. das N-te Bild, wird ständig digital vom vorhergehenden Bild beispielsweise vom (N-1)-ten Bild subtrahiert. Die Quadrierung des digitalen Subtraktionsergebnisses (oder der Absolutwert der Subtraktion) zeigt sich auf dem Monitor als sichtbares Muster:

$$\begin{aligned}
 I_s &= I_{N-1}(x,y)_{\text{ave}} - I_N(\text{ave}) \\
 &= 2 I_0 \gamma [\cos \phi(x,y) + \sin \phi(x,y)] J_0(\Omega) \\
 &= 2\sqrt{2} I_0 \gamma \cos [\phi(x,y) - 45^\circ] J_0(\Omega)
 \end{aligned} \tag{11}$$

und

$$I_s^2 = 8 I^2 I_0 \gamma^2 \cos^2 [\phi(x,y) - 45^\circ] J_0^2(\Omega) \tag{12}$$

Wenn sich die Frequenz der Objektschwingung ändert, verändert sich das Streifenmuster entsprechend und kann in quasi-Echtzeit beobachtet werden. Gl. (12) beschreibt ein erfindungsgemäßes Echtzeit-Subtraktions-Streifenmuster eines schwingenden Objekts, das durch ein Streifensystem $J_0^2(\Omega)$ moduliert wird, dessen Streifenkontrast exzellent ist. Weiterhin wird die Zeitdifferenz zwischen der Registrierung der aktuellen und Referenz-Bilder stark verkürzt, wodurch niederfrequente Störungen infolge von thermischen Luft- und Umgebungsschwingungen unterdrückt werden. Diese Vorteile gegenüber der konventionellen Echtzeit-Subtraktions-Technik, bei der das Streifensystem lediglich mit $[1 - J_0(\Omega)]$ moduliert wird, werden für die qualitative Analyse wie NDT und flächenoptische "Modalanalyse" genutzt.

Als Untersuchung für NDT zeigt sich bei einer schwingenden Platte mit Kerben unterschiedlicher Geometrie, daß beim stetigen Erhöhen der Anregungsfrequenz die Resonanzfrequenzen die unterschiedlichen Kerben bei höheren Werten sichtbar werden lassen als die Grundplatte selbst. Die andere Anwendung dieser Technik ist die qualitative "Modalanalyse" zum einfachen Auffinden von Resonanzfrequenzen. Das Streifenmuster des zeitgemittelten Digital-Shearogramms zeigt die Ableitung des Amplitudenvektors an jedem Punkt der Objektoberfläche; darin ist für den Streifen mit der größten Helligkeit $\Omega = 0$. Wenn man berücksichtigt, daß $\Omega = \delta x (4\pi/\lambda)(\partial w/\partial x)$ und der Shearabstand $\delta x (4\pi/\lambda) \neq 0$ ist, sind die hellsten Streifen die, für die die Ableitung des Amplitudenvektors ($\delta w/\delta x$) Null ist. Deshalb sind die Stellen, an denen die Verformungsgradienten Null sind, d. h. mit Streifen nullter Interferenzordnung, leicht in einem digitalen Zeitmittlungs-Shearogramm zu detektieren. Der Streifen nullter Ordnung ist ein wichtiger Parameter für die weitere Analyse und Auswertung von Digital-Shearogrammen.

Zahlenmäßige Auswertung des Digital-Shearogramms eines schwingenden Objekts

Die zahlenmäßige Analyse eines Digital-Shearogramms setzt die Kenntnis der Phasenverteilung voraus. Obwohl die Zeitmittelungstechnik das erlaubt, setzt die Phasenschritt-Methode die Anwendung der optischen Phasenmodulation synchronisiert mit der Objektschwingung in Frequenz und Phase voraus, was die Steuerung und Automatisierung kompliziert.

Mit der Phasen-Schiebetechnik von K. Creath kann die Phasenverteilung von Interferogrammen gewonnen werden. Jedoch eignet sich diese Technik nur zum Auswerten von Streifenmustern quasistatischer Verformungen, weil sie die Registrierung von drei oder vier Interferogrammen des gleichen Verformungszustands erfordert. Mit der Anwendung der stroboskopischen Beleuchtung unter erfindungsgemäßem Einsatz eines akustooptischen Modulators (AOM) kann das Interferogramm in jedem Punkt der Schwingungsperiode eingefroren werden, wenn das Objekt mit kurzen Lichtpulsen beleuchtet wird, die mit der Objektschwingung synchronisiert sind (Fig. 6). Mit der Phasen-Schiebe-Technik läßt sich damit die Phasenverteilung des Shearogramms für schwingende Objekte erhalten.

Die relative Phasenverteilung Φ_α und Φ_β (im Schwingungszustand α und β) kann nur in den Grenzen von 2π bestimmt werden, denn die ermittelte relative Phasendifferenz Δ wird im Bereich 0 bis 2π entfaltet und ergibt als Phasenverteilung ein Modulo- 2π -Streifenmuster. Die schwarzen Punkte korrespondieren mit Phasenwerten Null und die weißen Punkte mit Phasenwerten 2π . Eine nichtentfaltete Phasenverteilung kann mittels eines Entfaltungs-Algorithmus bestimmt werden, so daß automatische und zahlenmäßige Auswertungen nicht vorgenommen werden können, solange lediglich die nichtentfaltete Phasenverteilung vorliegt.

Fig. 8 zeigt die dynamische Untersuchung einer Turbinen-Schaufel und in Fig. 8a das Prüfobjekt. Die Phasenverteilung des Shearogramms zeigt direkt die Verformungsgradienten $\delta w/\delta x$ bei einer Anregungsfrequenz $f = 1572$ Hz (Fig. 8b). Fig. 8c zeigt die demodulierte Phasenverteilung.

Da die Phasenverteilung für jeden Pixelpunkt in den demodulierten Phasenwerten des Shearogramms zahlenmäßig bestimmt ist, kann das Verformungsfeld $w(x,y,t)$ als Schwingungsform durch Integration bestimmt werden. Der Schlüssel hierzu liegt in der exakten Kenntnis der Größe für $\delta w/\delta x$ und in der Bestimmung des Interferenzstreifen nullter Ordnung, d. h. für die Stellen $\delta w/\delta x = 0$. I. a. müssen die Randbedingungen des zu analysierenden Objekts zur Integration bekannt sein, aber mittels der Interferenzstreifen nullter Ordnung können diese Stellen einfach mit der Zeitmittlungs-Methode bestimmt werden. Weiterhin kann das Streifenmuster, beinhaltend die Ganzfeld-Biege- und Scherdehnungen als zweite Ableitungen der out-of-plane Verformung in Platten durch Differentiation der entfalteten Phasenverteilung für $\delta w/\delta x$ erhalten werden.

Zu den beiden praktischen Techniken für die qualitative und quantitative Schwingungsanalyse mittels Digital-Shearografie gehört somit die erfindungsgemäße Echtzeit-Subtraktions-Methode mit dem fortlaufend erneuerten Referenz-Bild, so daß die Zeitdifferenz zur Registrierung des laufenden und Referenz-Bildes stark reduziert wird verglichen mit der konventionellen Technik. Dadurch werden nicht nur die Starrkörperverschiebungen — bedingt durch das "self-referencing" optische System der Shearografie —, sondern auch niederfrequente Störungen wie Luft- und Umgebungsschwingungen unterdrückt.

Durch die Anwendung von Lichtsensoren mit einem akusto-optischen Modulator unter Einsatz der Phasenschiebe-Technik kann die Phasenverteilung des Shearogramms für ein schwingendes Objekt erhalten werden. Die daraus resultierende relative Phasendifferenz, die die Verformungsableitungen beschreibt, wird zahlenmäßig bestimmt. Obwohl lediglich ein eindimensionales dynamisches Phänomen untersucht wird, können ebene und räumliche dynamische Probleme ebenfalls analysiert werden.

Fig. 6 zeigt das Prinzip der erfindungsgemäßen Digital-Shearografie mit stroboskopischer Beleuchtung unter Einsatz eines durch ein Steuergerät gesteuerten akusto-optischen Modulators (AOM). Die stroboskopische Beleuchtung wird durch Triggerung der Bragg-Zelle erreicht. Die Lichtpulse, die mit der Objektschwingung synchronisiert sind, werden vom Funktionsgenerator zur Schwingungserzeugung abgeleitet und vom Steuergerät weitergeleitet, an dem die Triggerposition und -weite eingestellt wird (Fig. 6 unten). Das Steuergerät stimmt zuerst die Triggerposition zum Generieren der Pulse mit einer festen Phase α in jeder Schwingungsperiode ab. Die Intensitäten, die mit jedem Lichtblitz verbunden sind, werden durch die CCD-Kamera aufsummiert und ergeben ein Shearing-Speckle-Interferogramm. Es ist ersichtlich, daß das Interferogramm für einen bestimmten Deformationszustand eingefroren wird. Deshalb kann es mit der Phasenschiebe-Technik weiterverarbeitet werden, um die Phasenverteilung des Shearogramms für ein schwingendes Objekt zu erhalten, wozu der piezoelektrisch gesteuerte Spiegel 2 im Michelson-Interferometer (Fig. 6) verwendet wird. Der D/A-Wandler liefert die notwendigen Spannungsschritte für die Phasenschiebung von 0, $\pi/2$, π bis $3\pi/2$ durch den Spiegel 2. Damit werden 4 Bilder erhalten, die die relative Phasenverteilung Φ_α des Interferogramms aus den Intensitätsdaten bestimmen:

$$\Phi_\alpha = \arctan [(I_4 - I_2)/(I_1 - I_3)] \quad (13)$$

Danach stimmt der Synchronisator die weitere Triggerposition ab, um Lichtblitze für eine bestimmte Phase β eines Verformungszustands in jeder Schwingungsperiode zu erzeugen. Weitere 4 Bilder mit Intensitätsdaten werden dadurch aufgenommen, daß die Phase um die gleichen Beträge wie beim ersten Datensatz geschoben wird. Die relative Phasenverteilung Φ_β des veränderten Interferogramms wird wie Φ_α berechnet. Daraus kann die relative Phasendifferenz Δ einfach durch Subtraktion mit Φ_β von Φ_α berechnet werden, und die Phasenverteilung des Shearogramms zeigt die folgende relative Phasenverteilung

$$\Delta = \begin{cases} \phi_\alpha - \phi_\beta & \text{für } \phi_\alpha \geq \phi_\beta \\ \phi_\alpha - \phi_\beta + 2\pi & \text{für } \phi_\alpha < \phi_\beta. \end{cases} \quad (14)$$

Fig. 7 zeigt die Phasenverteilungen eines Shearogramms für eine schwingende Kreisplatte nach Fig. 5, angeregt mit den gleichen Frequenzen 1270 Hz, 4300 Hz und 4860 Hz (von links nach rechts). Da die relative Phasendifferenz Δ der Shearografie mit den Verformungsgradienten $\partial w/\partial x$ (in x-Shearrichtung) oder $\partial w/\partial y$ (in y-Shearrichtung) für senkrechte Beleuchtung und Beobachtung verknüpft ist, beschreibt die Phasenverteilung des Shearogramms Ganzfeld-Informationen der Verformungsgradienten $\partial w/\partial x$ oder $\partial w/\partial y$ zahlenmäßig.

Weitere Einzelheiten der erfindungsgemäßen Echtzeit-Betrachtung und der erfindungsgemäßen stroboskopischen Beleuchtung in Verbindung mit der Phasen-Schiebe-Methode ergeben sich aus den Fig. 6 und 11, 12 wie folgt:

Die von einem schwingenden oder bewegten Objekt diffus reflektierten Lichtquellen werden nach ihrer Überlagerung als Speckle-Interferogramm gespeichert, das man sich aus der Überlagerung einer Vielzahl von Einzelinterferogrammen entstanden denkt, wobei jedes einen augenblicklichen Zustand des bewegten Objekts repräsentiert. Die Superposition aus den Einzelintensitäten resultiert aus der Tatsache, daß die Geschwindigkeit der Objektbewegung klein im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit ist. In differentiellen Schritten werden somit die Zwischenzustände des Objekts aufgezeichnet.

Erfindungsgemäß bedeutet die Echtzeit-Differenz-Technik mit ständig erneuertem Referenzbild, daß das Streifenmuster eines schwingenden Objekts, welches durch ein Streifensystem moduliert wird und mit $J_0^2(\Omega)$ anstelle von $[1 - J_0(\Omega)]$ beschrieben wird, worin J_0 die Bessel-Funktion erster Art nullter Ordnung und $\Omega = \delta x (4\pi/\lambda) (\partial w/\partial x)$ bedeuten, in Echtzeit beobachtet werden kann. Der Kontrast der Streifen wird sehr viel besser als bei der Echtzeit-Differenz-Methode mit einem festgelegten Referenzbild. Weiterhin ist das Zeitintervall zwischen der Aufnahme der aktuellen und der Referenz-Bilder sehr viel kürzer. Deshalb werden niederfrequente Störungen infolge Wärmeschlieren und niederfrequenten Schwingungen weitgehend unterdrückt.

Mit der Einführung einer stroboskopischen Beleuchtung, die einen akusto-optischen Modulator (AOM) verwendet, kann das Interferogramm, nämlich das Speckle Muster, in jedem Punkt des Schwingungsvorgangs eingefroren werden, indem das Objekt mit kurzen stroboskopischen Lichtblitzen, die mit der Schwingungserregung synchronisiert sind, beleuchtet wird; es kann mit der Phasenschiebetechnik ausgewertet werden, um die Phasenverteilung des Shearogramms für ein schwingendes Objekt zu erhalten.

Die relativen Phasenverteilungen Φ_α (beim Deformationszustand 1) und Φ_β (beim Deformationszustand 2) können in den Grenzen von 2π bestimmt werden, so daß die berechnete relative Phasendifferenz $\Delta = \Phi_\alpha - \Phi_\beta$ im Bereich zwischen 0 und 2π liegt und die Phasenverteilung ein modulo- 2π -Streifenmuster ist. Die schwarzen Stellen entsprechen den Phasenwerten Null und die weißen Stellen den Phasenwerten 2π . Eine demodulierte Phasenverteilung kann mittels Phasen-Demodulations-Algorithmus bestimmt werden, die Voraussetzung für die

automatische und zahlenmäßige Auswertung ist.

Beim Anlegen einer HF-Erregung an den AOM wird dieser für die Laserbeleuchtung aktiviert. In der Vorrichtung nach Fig. 6 erzeugt das Steuergerät aus einer externen Signalquelle (rechnersteuerbarer Funktionsgenerator) das Steuersignal für den piezoelektrischen Schwingungserreger am Untersuchungsobjekt und synchron dazu das in Phasenlage und Dauer einstellbare Steuersignal zur Öffnung des mit Ultraschall schwingenden Gitters im AOM. 5

Der Anschluß einer externen Signalquelle als Ausgangsgröße hat den Vorteil, daß per Hand- oder Rechner-einstellung die Resonanzpunkte des Untersuchungsobjektes durchfahren werden können.

Als grundlegende Anforderung muß das Steuergerät den Belichtungszeitpunkt immer wieder auf den gleichen Punkt der Erregungskurve steuern, auch wenn sich die Frequenz der Erregung ändert. Es muß also eine phasenstarke Verbindung zwischen dem Erregersignal des Prüfobjekts und dem Öffnungssignal des AOM hergestellt werden. 10

Zudem soll der Zeitpunkt der Beleuchtung auf der Erregungskurve in Gradschritten einstellbar sein ($0-360^\circ$). Die Öffnungsdauer des AOM-Gitters soll ebenfalls in Gradschritten einzustellen sein ($1-90^\circ$).

Zur Erzeugung des Erregersignals werden nach Fig. 11 jeweils 360 Eingangsimpulse (f_m) auf einen Binärzähler gezählt. Die parallelen Zählerausgänge dienen dann als Adreßleitungen für ein Speicher-E-PROM. In dem E-PROM sind digital die Werte einer Sinus-Funktion abgelegt, die durch Hochzählen der Zählerwerte nacheinander ausgelesen werden. Anschließend werden die digitalen Werte über eine D/A-Wandlung und einen Verstärker zur Ansteuerung des Piezo-Verstärkers zur Erregung des Prüfobjekts nach außen geleitet. 15

Während jeder Eingangsimpuls (f_m) einen Wert der Erreger-Sinus-Kurve erzeugt, wird gleichzeitig mit dem Wert 00 eine Verzögerung der Schaltung gestartet, die nach einer einstellbaren Anzahl von Eingangsimpulsen (d. h. zu einem bestimmten Wert der Erreger-Sinus-Kurve) über den HF-Modulator den AOM veranlaßt, das Gitter zu öffnen. 20

Dies kann zu jedem $1/360$. Teil der Sinuskurve (d. h. 1°) eingestellt werden. Nach Ablauf von wiederum einstellbaren $1-90$ Eingangsimpulsen ($\approx 1-90^\circ$ der Sinuskurve) wird das schwingende Gitter des AOM wieder in Ruhelage gebracht. Nach 360 Eingangsimpulsen (d. h. einer kompletten Sinusperiode) werden alle Zähler und Verzögerungsregister gelöscht und der Ablauf wird wiederholt. 25

Zur leichteren Bedienung befindet sich am Gerät noch ein Monitorausgang am HF-Teil, der unabhängig das Ausgangstor messen und ggf. darstellen kann. Ein externer Eingang erlaubt die Nutzung des AOMs auch ohne die Funktion des Steuergeräts. 30

Durch den internen Aufbau muß die Eingangsfrequenz genau 360mal größer sein als die gewünschte Erregerfrequenz. Eine optionale Frequenzanzeige der Erregerfrequenz erlaubt eine leichtere Einstellung der Resonanzpunkte des Prüfkörpers. 35

Das Steuergerät ist in einem Norm-Elektronik-Gehäuse der Abmessungen $500 \times 140 \times 320 \text{ mm}^3$ eingebaut (Fig. 12).

Intern befinden sich zwei Funktionsplatten

- Torgenerierung
- digitaler Sinusgenerator

sowie ein Netzteil und der zugekaufte HF-Modulator für den akusto-optischen Modulator (AOM) im Gehäuse. Optional ist eine Frequenzanzeige der Erregerfrequenz (f_{out}) eingebaut und an der Frontplatte ablesbar. Denkbar wäre ebenfalls, einen einstellbaren Rechteckgenerator zur internen Erzeugung der Eingangsimpulse (f_m) in das Gehäuse einzubauen. 40

Auf der Frontplatte befinden sich die Bedienelemente wie

- Taster Reset
- Daumenradschalter 3-stellig für Verzögerung $0-360^\circ$
- Daumenradschalter 2-stellig für Verzögerung $1-99^\circ$
- Drehpotentiometer für die Ausgangsamplitude von f_{out}
- Netzschalter

sowie die BNC-Anschlußbuchsen für

- die Eingangsimpulse f_m
- die Erregerfrequenz f_{out}
- Monitorausgang für das Torsignal (TTL-Pegel)
- HF-Ausgang zum Anschluß des AOMs
- Externer Steuereingang für HF-Modulator ($0-5 \text{ V}$).

Der Netzanschluß befindet sich auf der Rückseite des Gerätes. 60

Patentansprüche

1. Verfahren zur shearografischen Ermittlung von Ableitungen der Verformung einer Oberfläche eines schwingenden Objekts in wenigstens eine ausgewählte Richtung, bei dem die Objektoberfläche mit kohärentem Licht bestrahlt und das von dieser diffus reflektierte Licht mittels eines ein Shearing-Element aufweisenden optischen Systems in einer Bildebene abgebildet und von der Objektoberfläche wenigstens 65

ein Null-Shearogramm und ein Belastungs-Shearogramm aufgenommen und beide Shearogramme voneinander subtrahiert werden, dadurch gekennzeichnet, daß anstelle Null-Shearogramms ein im jeweils vorhergehenden Videotakt aufgenommenes Referenz-Shearogramm verwendet wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Phase des Belastungs-Shearogramms im Vergleich zum Referenz-Shearogramm jeweils um einen vorgewählten Wert, beispielsweise um 90° , geschoben wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Ergebnis der Subtraktion, insbesondere der Absolutwert des Subtraktionsergebnisses, quadriert und dann auf dem Bildschirm sichtbar gemacht wird.

4. Verfahren zur shearografischen Ermittlung von Ableitungen der Verformung einer Oberfläche eines schwingenden Objekts in wenigstens eine ausgewählte Richtung, bei dem die Objektoberfläche mit kohärentem Licht bestrahlt und das von dieser diffus reflektierte Licht mittels eines ein Shearing-Element aufweisenden optischen Systems in einer Bildebene abgebildet und von der Objektoberfläche wenigstens ein Null-Shearogramm und ein Belastungs-Shearogramm aufgenommen wird, dadurch gekennzeichnet, daß das Objekt in Schwingungen versetzt und der Laserstrahl synchron dazu derart gesteuert wird, daß die Belichtung des Objekts jeweils nur während vorgewählter Schwingungszustände erfolgt.

5. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß Steuersignale zur Steuerung der Schwingungen des Objekts und zur damit synchronen Steuerung der Einschaltzeiten und -dauern des Laserstrahls erzeugt werden.

6. Vorrichtung zur shearografischen Ermittlung von Ableitungen der Verformung einer Oberfläche eines in Schwingungen versetzbaren Objekts, dadurch gekennzeichnet, daß sie zur Durchführung des Verfahrens nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 5 eingerichtet ist.

7. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß sie zusätzlich Mittel zur Phasenschiebung aufweist.

8. Vorrichtung nach Anspruch 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, daß sie Mittel zur wahlweisen permanenten Einschaltung des Laserstrahls aufweist.

9. Vorrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Mittel einen akusto-optischen Modulator (AOM) enthalten.

Hierzu 6 Seite(n) Zeichnungen

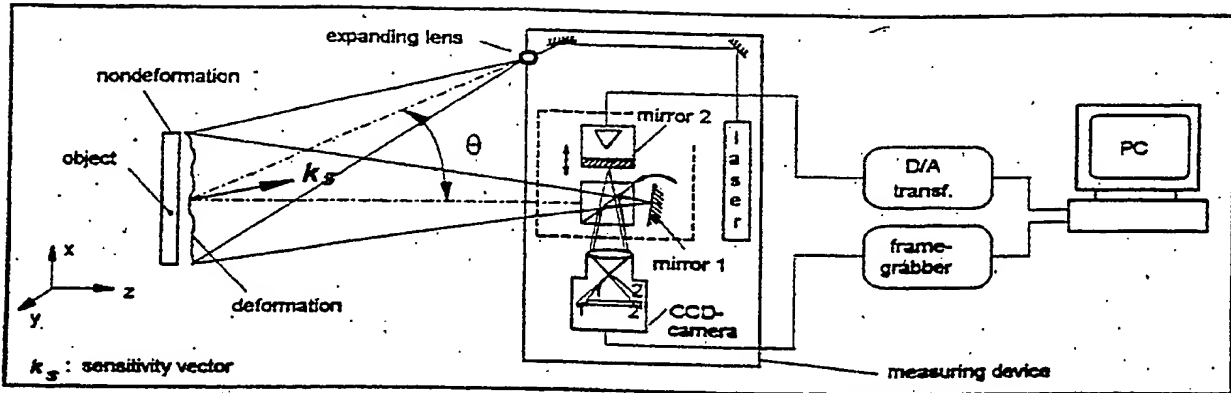


Fig. 1.

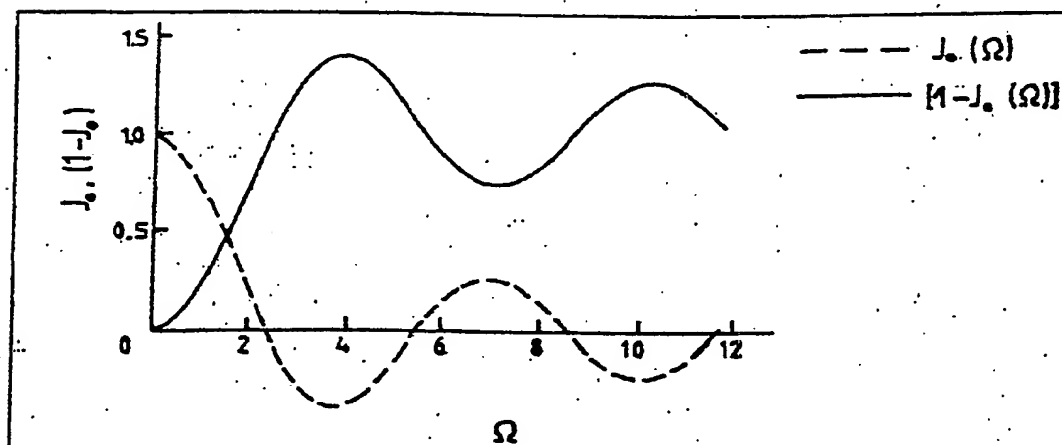


Fig. 2.

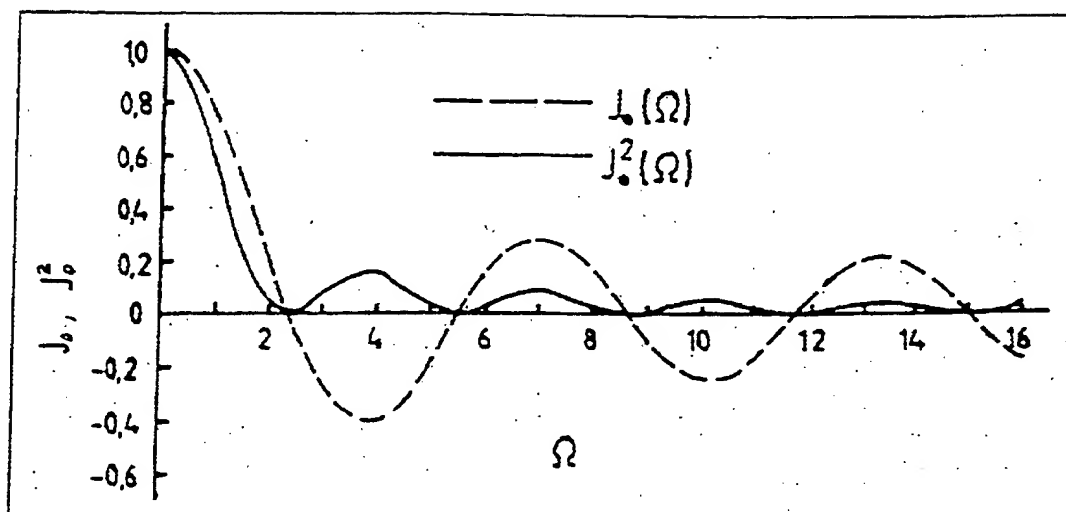


Fig. 3.

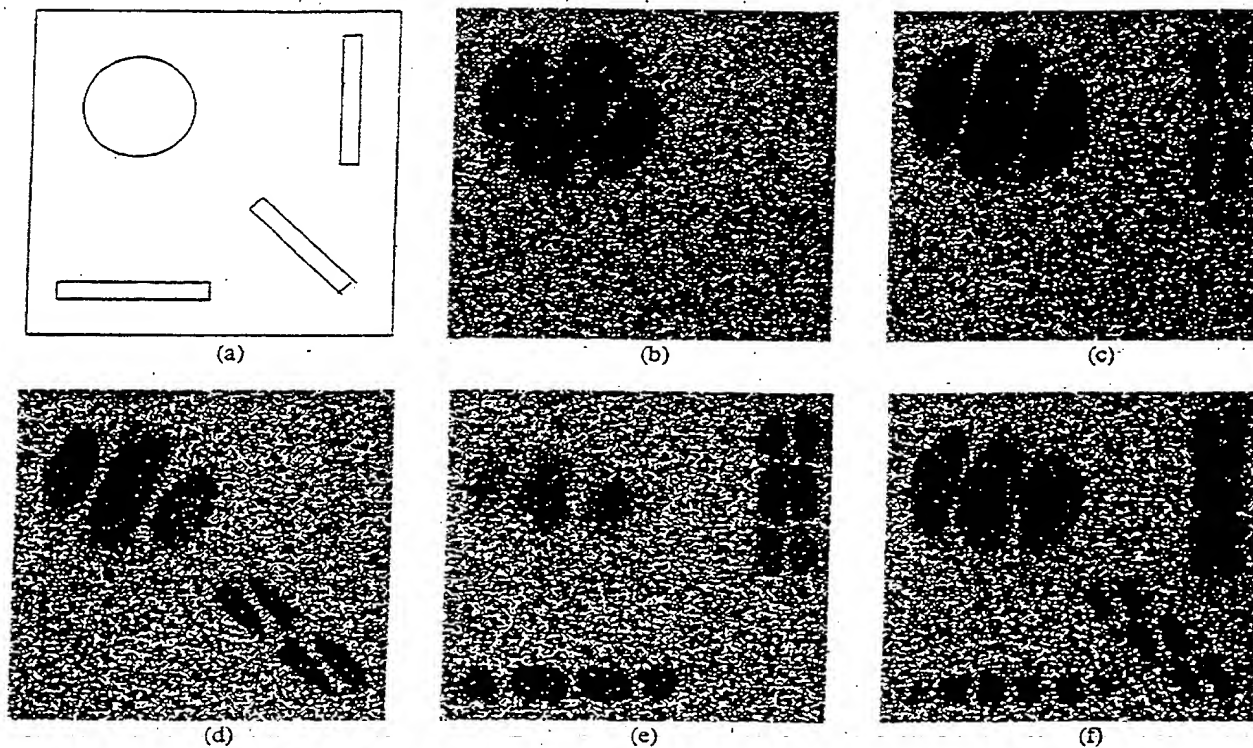


Fig. 4.

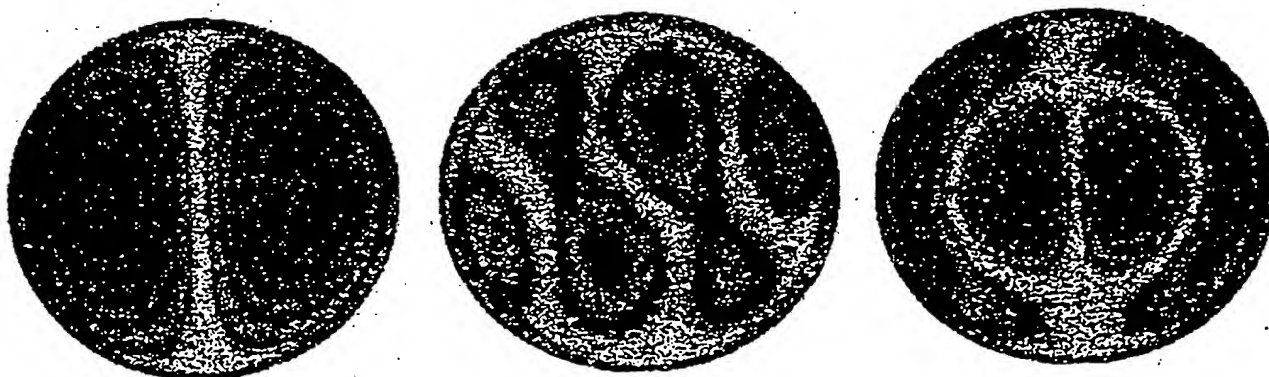


Fig. 5.

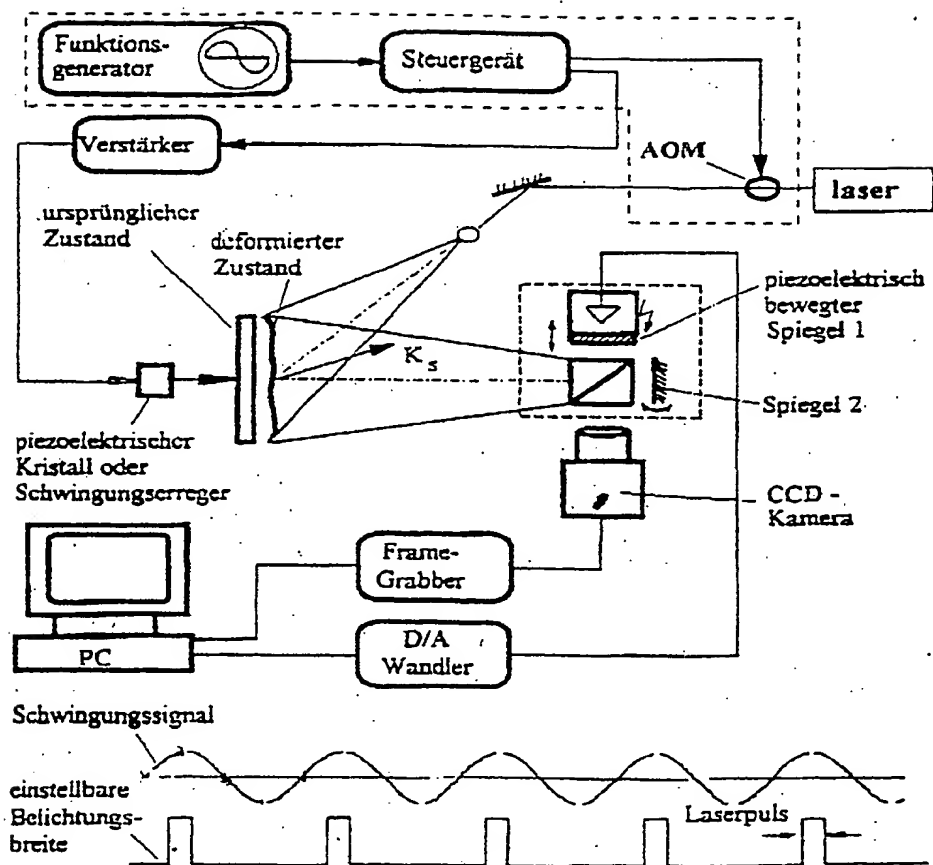


Fig. 6

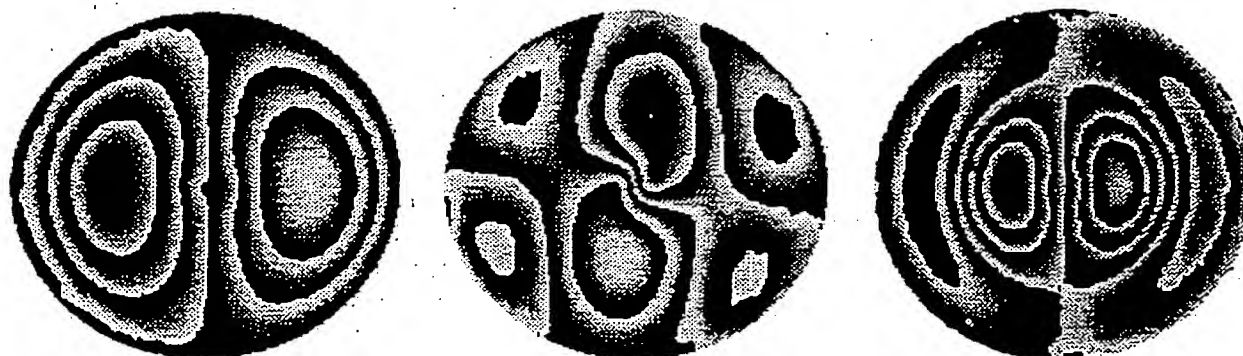
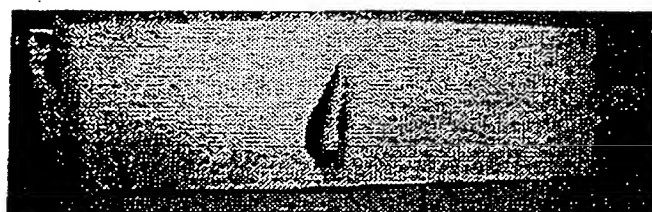


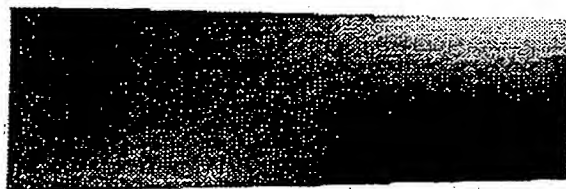
Fig. 7.



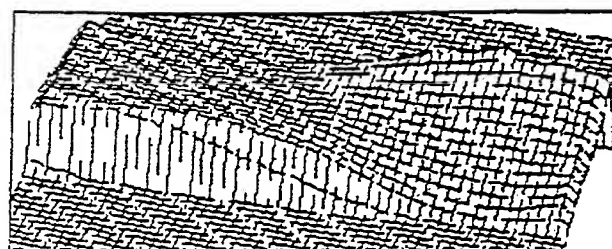
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 8.

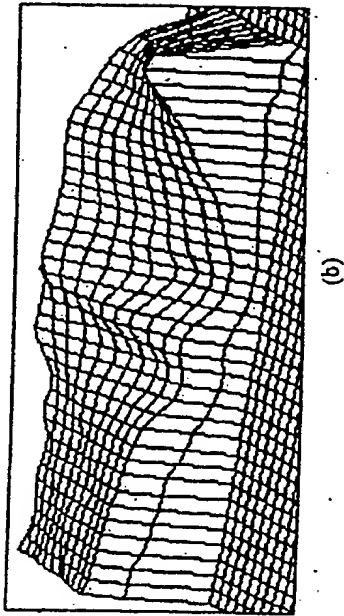


(a)



(b)

Fig. 9.



(a)



(b)

Fig. 10.

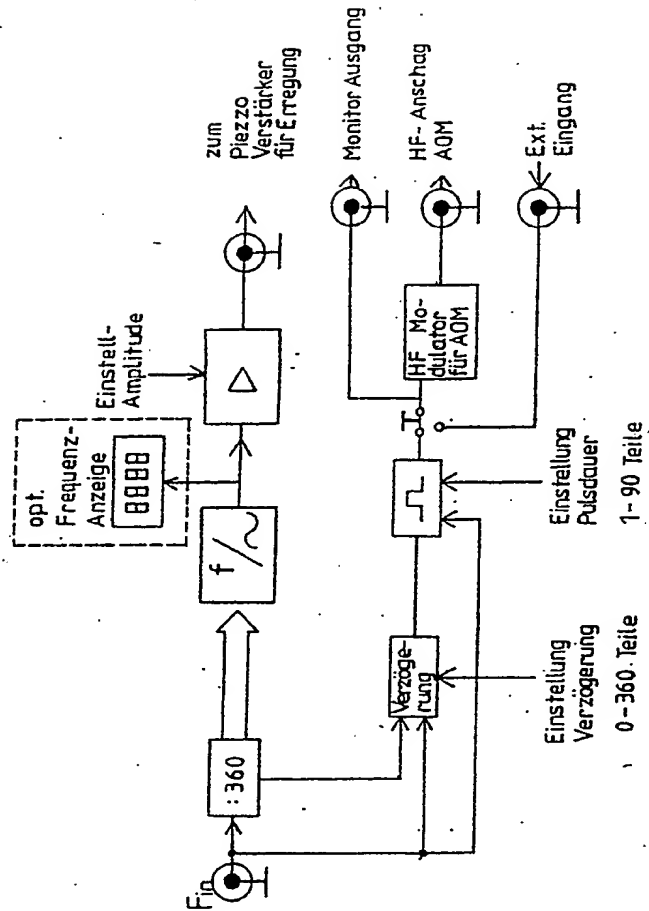


Fig. 11

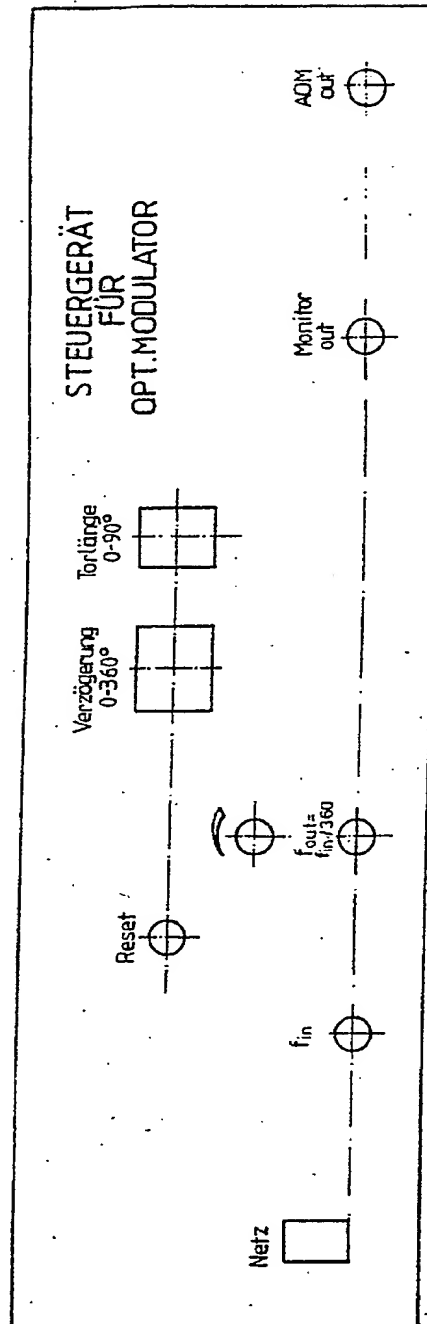


Fig. 12